

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Aplikace fázovacích článků**  
**All-pass Filters Application**

**2014**

**Zdeněk Macháček**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Zdeněk Macháček**  
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie  
Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie  
Téma: Aplikace fázovacích článků  
All-pass Filters Application

### Zásady pro vypracování:

Na fázovací článek můžeme pohlížet jako na samostatnou funkční jednotku mnohých elektronických zařízení. Jeho základní vlastností je konstantní amplitudová frekvenční charakteristika a variabilní fázová frekvenční charakteristika.

1. Proveďte teoretický rozbor fázovacího článku s operačním zesilovačem.
2. Uveďte příklady využití fázovacích článků při konstrukci frekvenčních filtrů a oscilátorů.
3. Navrhněte a prakticky ověřte pásmovou propust se střední frekvencí  $f = 1$  kHz a jakostí  $Q = 30$ .

### Seznam doporučené odborné literatury:


PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN 1996, ISBN 80-901984-3-0  
DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. Praha: SNTL 1981  
NOVÁK, Mirko. *Syntéza frekvenčních filtrů*. Praha: ACADEMIA 1966  
HRUBÝ, Jaroslav, NOVÁK, Mirko. *Mikroelektronické filtry RC se zesilovači*. Praha: ACADEMIA 1976

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Witas**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2014

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7. května 2014

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Karlu Witasovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Účelem bakalářské práce je analýza a experimentální ověření fázovacích článků při konstrukci frekvenčních filtrů. V teoretické části jsou rozebrány nejběžnější řady fázovacích článků, podrobněji se věnuje fázovacím článkům s operačním zesilovačem. V další části také jejich využití při konstrukci oscilátorů a frekvenčních filtrů. Praktická část je věnována návrhu pásmové propusti s operačním zesilovačem a jejímu experimentálnímu zapojení, které je realizováno na nepájivém poli. Změřené výsledky jsou uvedeny v tabulkách a porovnány s teoretickými předpoklady.

## **Klíčová slova**

Fázovací článek, aktivní prvky

## **Abstract**

The purpose of this bachelor work is analysis and experimental verification allpass filters at the design frequency filters. The theoretical part deals with the most common orders allpass filters, It provides an analysis allpass filters with operational amplifier. In the next section as well as their use in the construction of oscillators and frequency filters. The practical part is devoted to design bandpass filter with operational amplifier and its experimental circuit that is implemented on the solder field. The measured results are shown in tables and compared with the theoretical assumptions.

## **Key words**

Allpass filter, active devices

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>B</b>	[-]	Šířka pásma
<b>C</b>	[F]	Kapacita
<b>C1</b>	[F]	Kapacita 1
<b>C2</b>	[F]	Kapacita 2
<b>Cm</b>	[F]	Kapacita m
<b>Cn</b>	[F]	Kapacita n
<b>Fm</b>	[Hz]	Mezní kmitočet
<b>Fh</b>	[Hz]	Horní mezní kmitočet
<b>Fd</b>	[Hz]	Dolní mezní kmitočet
<b>Fr</b>	[Hz]	Frekvence kmitů oscilátoru
<b>Fo</b>	[Hz]	Frekvence střední
<b>K</b>	[dB]	Zesílení
<b>N</b>	[-]	Počet RC článků
<b>P</b>	[dB]	Přenos
$\overline{P_{pp}}$	[dB]	Přenos pásmové propusti
$P_z$	[dB]	Přenos zesilovače
<b>Q</b>	[-]	Činitel jakosti
<b>Qe</b>	[-]	Činitel jakosti systému
<b>R</b>	[Ω]	Odpor
<b>R1</b>	[Ω]	Odpor 1
<b>R2</b>	[Ω]	Odpor 2
<b>R3</b>	[Ω]	Odpor 3
<b>Ra</b>	[Ω]	Odpor a
<b>Rb</b>	[Ω]	Odpor b
<b>Rm</b>	[Ω]	Odpor m
<b>Rn</b>	[Ω]	Odpor n
<b>Ri</b>	[Ω]	Odpor i
<b>Ui</b>	[V]	Napětí vstupní
<b>Uo</b>	[V]	Napětí výstupní
<b>U1</b>	[V]	Napětí na svorce 1
<b>U2</b>	[V]	Napětí na svorce 2
<b>U3</b>	[V]	Napětí na svorce 3
<b>Ub</b>	[V]	Napětí na svorce b
<b>U+</b>	[V]	Napětí kladné
<b>U-</b>	[V]	Napětí záporné
$\varphi$	[°]	Fázový posun

# Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
FC	Fázovací článek
OZ	Operační zesilovač
DPS	Deska plošných spojů



# Obsah

1	Úvod .....	- 10 -
2	Všehpropustné Fázovací články .....	- 11 -
2.1	Fázovací články prvního řádu .....	- 12 -
2.1.1	Pasivní RC fázovací článek prvního řádu .....	- 13 -
2.2	Fázovací články druhého řádu .....	- 15 -
2.2.1	Pasivní RLC fázovací článek druhého řádu .....	- 16 -
2.3	Teoretický rozbor fázovacího článku s operačním zesilovačem .....	- 17 -
2.3.1	Fázovací článek FJ1 .....	- 18 -
2.3.2	Fázovací článek FJ2 .....	- 21 -
3	Příklady využití fázovacích článků .....	- 24 -
3.1	Oscilátor s fázovacími články z diskretních součástek .....	- 24 -
3.2	Oscilátor s fázovacími články s aktivním prvkem .....	- 25 -
3.3	Pásmová propust s vazbou typu „bootstrap“ .....	- 26 -
4	Experimentální ověření pásmové propusti .....	- 29 -
4.1	Teorie pásmové propusti s vazbou typu „bootstrap“ .....	- 29 -
4.2	Realizace pásmové propusti s vazbou typu „bootstrap“ .....	- 31 -
4.2.1	Výstupní charakteristiky .....	- 34 -
4.2.2	Fotografie zkonstruované pásmové propusti .....	- 36 -
	Závěr .....	- 37 -
	Použitá literatura .....	- 38 -
	Seznam příloh .....	I

# 1 Úvod

V první části se moje bakalářská práce zabývá principem nejběžnějších řádů fázovacích článků. Je zde podrobněji rozebrán fázovací článek s operačním zesilovačem.

Další kapitola mé bakalářské práce se zabývá využitím fázovacích článků při konstrukci oscilátorů a frekvenčních filtrů. Je zde rozepsán příklad použití oscilátoru s fázovacími články ve zpětné vazbě konstruován z diskrétních součástek, nebo s využitím operačních zesilovačů. Věnuji se zde i pásmové propusti s operačním zesilovačem, kterou v další části bakalářské práce experimentálně ověřuji.

V další části se již věnuji zmíněnému experimentálnímu ověření pásmové propusti s operačním zesilovačem. Je zde sepsán celý návrh této pásmové propusti, volba součástek pro konstrukci a následně i naměřené výsledky, včetně přenosových charakteristik a grafů. Výsledky měření jsou zde rozebrány a srovnány s výsledky vypočítanými. Jsou zde zmíněny problémy, se kterými jsem se při měření setkal a je zde obsažena i fotografie z konstrukce obvodu.

## 2 Všeprupustné fázovací články

Všeprupustné fázovací články umožňují upravovat průběh fázové charakteristiky soustavy beze změny modulové charakteristiky. Používají se při konstrukci zpožďovacích článků, fázovacích korektorech, nebo místo integrátorů ve filtrech.

Přenos fázovacího článku  $n$ -tého řádu lze vyjádřit ve tvaru

$$K(s) = K_0 \frac{\prod_{n=1}^N (s^2 - b_{1n}s + b_{0n})}{\prod_{n=1}^N (s^2 + b_{1n}s + b_{0n})} \quad (2.1)$$

Pro polohu nulových bodů a pólů  $n$ -tého řádu fázovacího článku lze odvodit

$$\begin{aligned} n_1 + n_2 &= b_1 & p_1 + p_2 &= -b_1 \\ n_1 * n_2 &= b_0 & p_1 * p_2 &= b_0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Pro komplexní rovinu dostaneme

$$\begin{aligned} (Re \dot{n})^2 + (Im \dot{n})^2 &= (Re \dot{p})^2 + (Im \dot{p})^2 \\ Re \dot{n} &= -Re \dot{p} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Pro stabilní obvod musí póly ležet v levé polorovině komplexní roviny a nulové body v pravé polorovině symetricky vzhledem k imaginární ose komplexní roviny. Fázovací články  $n$ -tého řádu mají konstantní modulovou kmitočtovou charakteristiku.

$$K(\omega) = K_0 \quad (2.4)$$

Fázová charakteristika fázovacího článku  $n$ -tého řádu je dána příspěvky všech nulových bodů a pólů přenosové funkce.

$$\varphi(\omega) = \sum_n \varphi_n = -2 \sum_n \arctan \frac{b_{1n}\omega}{1 - b_{2n}\omega^2} \quad (2.5)$$

Pro skupinové zpoždění fázovacího článku  $n$ -tého řádu platí

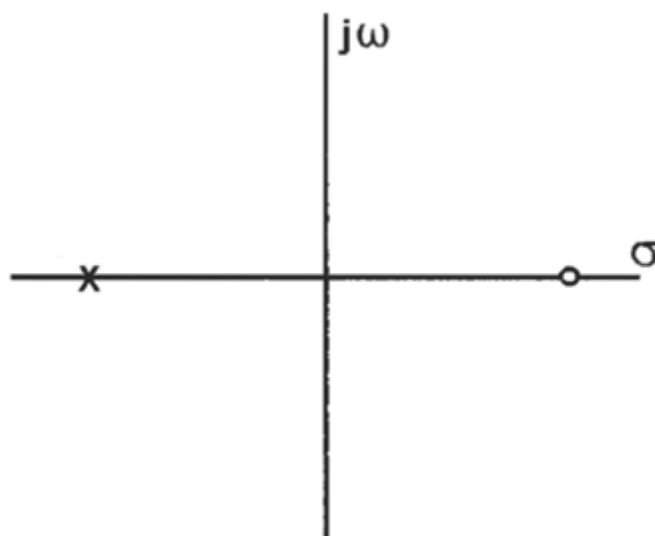
$$\tau(\omega) = \frac{1}{\pi} \sum_n \frac{b_{1n}(1 + b_{2n}\omega^2)}{1 + (b_{1n}^2 - 2b_{2n})\omega^2 + b_{2n}^2\omega^4} \quad (2.6)$$

## 2.1 Fázovací články prvního řádu

Přenos fázovacího článku prvního řádu lze vyjádřit ve tvaru

$$K(s) = K_0 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (2.7)$$

Rozložení nulových bodů „o“ a pólů „x“ v komplexní rovině musí být symetrické podle imaginární osy. Pro zajištění stability obvodu se pól „x“ musí nacházet na záporné reálné ose a ve stejné vzdálenosti od počátku, se musí nacházet bod „o“ na kladné reálné ose.



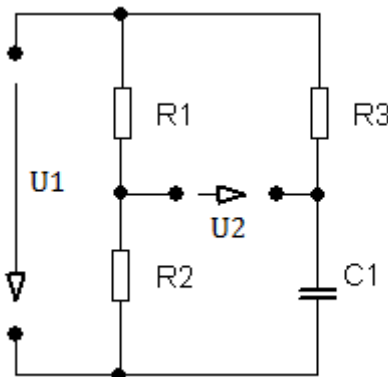
Obrázek 2.1: Diagram možného rozložení nulových bodů a pólů FČ 1. Řádu

Fázový posuv je

$$\varphi(\omega) = -2 * \arctg\left(\frac{\omega}{b_0}\right) \quad (2.8)$$

Skupinové zpoždění fázovacího článku prvního řádu je největší na nízkých frekvencích a je nepřímo úměrná frekvenci. Fázovací články prvního řádu lze konstruovat pomocí operačních zesilovačů, nebo pasivních součástek.

## 2.1.1 Pasivní RC fázovací článek prvního řádu



Obrázek 2.2: Schéma pasivního RC fázovacího článku 1. řádu

Přenos fázovacího článku je vyjádřen ve tvaru

$$K(s) = K_o \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (2.9)$$

Z čehož plyne, že přenos na vysokých kmitočtech bude  $K_\infty = -1$  a na nízkých kmitočtech

$$K_0 = 1. \quad (2.10)$$

Fázový posuv bude dvojnásobný při srovnání s obdobným obvodem s minimálním argumentem.

$$\varphi(\omega) = -2 * \arctan(\omega) \quad (2.11)$$

Čemuž odpovídá dvojnásobné skupinové zpoždění, počáteční hodnota skupinového zpoždění je rovna

$$\tau(0) = b_1/\pi \quad (2.12)$$

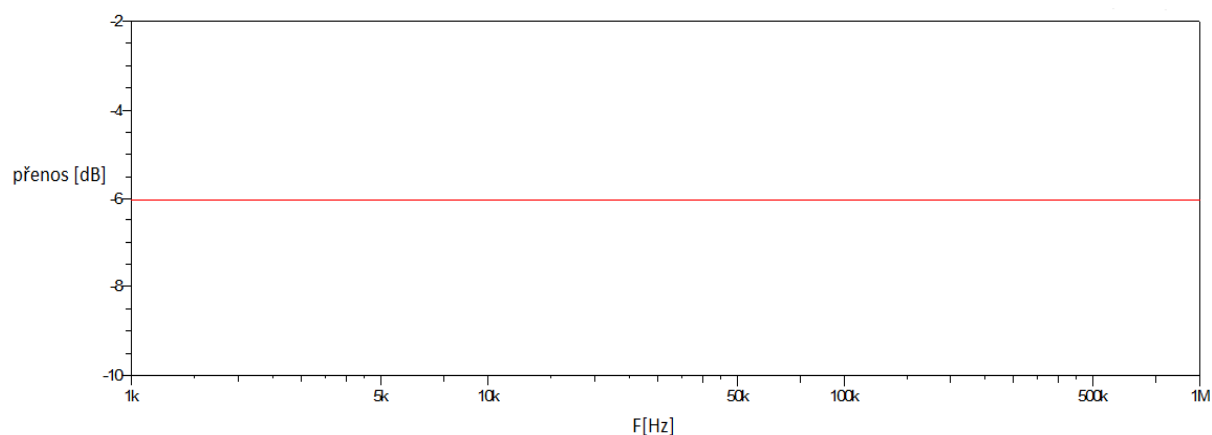
Nulový bod a pól leží symetricky na reálné ose.

Vzorec napět'ového přenosu je získán programem SNAP

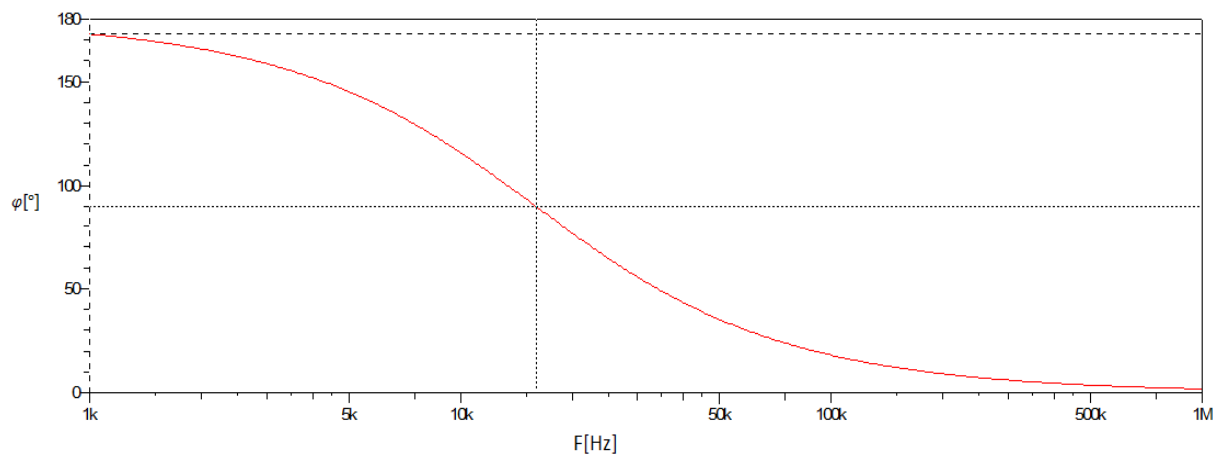
$$\frac{-R_1}{R_2 + R_1 + s(R_2 R_3 C_1 + R_1 R_3 C_1)}$$

Obrázek 2.3: Vzorec napět'ového přenosu FČ 1. řádu z programu SNAP

Z programu SNAP byl získán i graf napět'ového přenosu pro hodnoty součástek  $R = R_1 = R_2 = R_3 = 1\text{k}\Omega$ ,  $C = 10\text{nF}$ .



Obrázek 2.4: Závislost napět'ového přenosu fázovacího článku 1. řádu na frekvenci



Obrázek 2.5: Závislost fáze napět'ového přenosu fázovacího článku 1. řádu na frekvenci

Mezní kmitočet fázovacího článku 1. řádu je 16kHz pro úhel přenosu  $\varphi = 90^\circ$ .

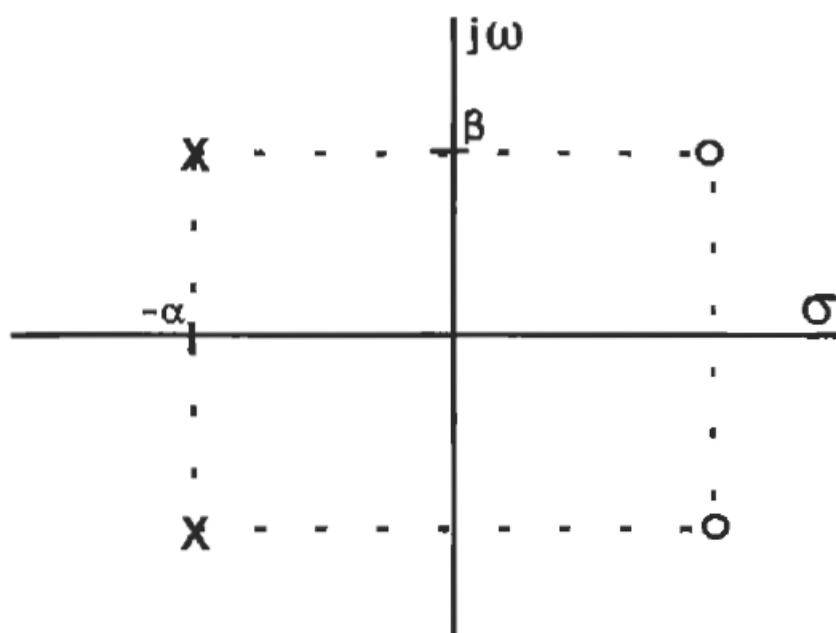
## 2.2 Fázovací články druhého řádu

Přenos fázovacího článku druhého řádu lze vyjádřit ve tvaru

$$K(s) = \frac{s^2 - \frac{\omega_p}{Q_p} * s + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} * s + \omega_p^2} \quad (2.13)$$

kde  $Q_p$  představuje činitel jakosti.

Fázovací článek druhého řádu má dvojici komplexních pólů a dvojici komplexních nul. Póly jsou umístěny symetricky na obou stranách reálné osy, vlevo od imaginární osy. Nuly jsou zrcadlový obraz pozice pólů a jsou umístěny na pravé straně imaginární osy.



Obrázek 2.6: Diagram možného rozložení nulových bodů a pólů FČ 2. Řádu

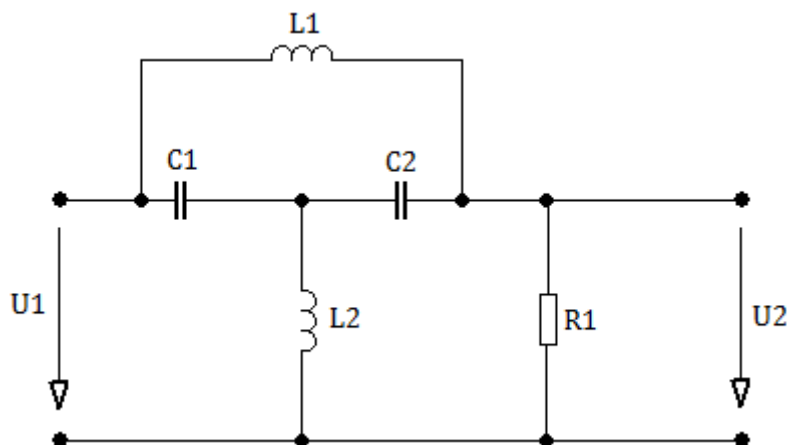
Fázový posuv je

$$\varphi(\omega) = -2 * \arctg\left(\frac{b_1 * \omega}{b_0 - \omega^2}\right) \quad (2.14)$$

Fázovací články druhého řádu lze konstruovat pomocí běžných operačních zesilovačů, nebo pasivních součástek RLC. Zapojení se součástkami RLC se nepoužívají z důvodu drahých a špatně realizovatelných indukčností. Při konstrukci z běžných operačních zesilovačů, bývá problém ve složitějším procesu návrhu.

### 2.2.1 Pasivní RLC fázovací článek druhého řádu

Tyto fázovací články jsou známy svojí nadměrnou citlivostí na parazitní vlastnosti součástek a proto se moc nevyužívají.



Obrázek 2.7: Pasivní RLC fázovací článek 2. řádu

Při simulaci v programu SNAP byly použity tyto hodnoty součástek  $C = C_1 = C_2 = 10\text{nF}$ ,  $L_1 = 40\mu\text{H}$ ,  $L_2 = 10\mu\text{H}$ ,  $R_1 = 22\text{k}\Omega$ . Vzorec napětového přenosu byl získán programem SNAP.

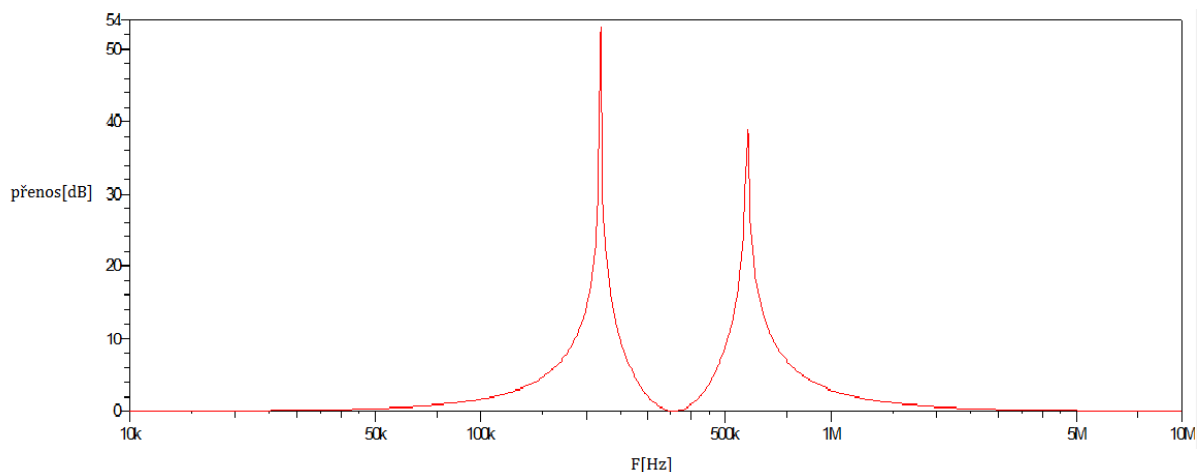
```

symbolic
R1
+s^(2)*( L2*C1*R1 +L2*C2*R1 )
+s^(4)*( L1*L2*C1*C2*R1 )
-----
R1
+s*( L1 )
+s^(2)*( L2*C1*R1 +L1*C2*R1 +L2*C2*R1 )
+s^(3)*( L1*L2*C2 +L1*L2*C1 )
+s^(4)*( L1*L2*C1*C2*R1 )

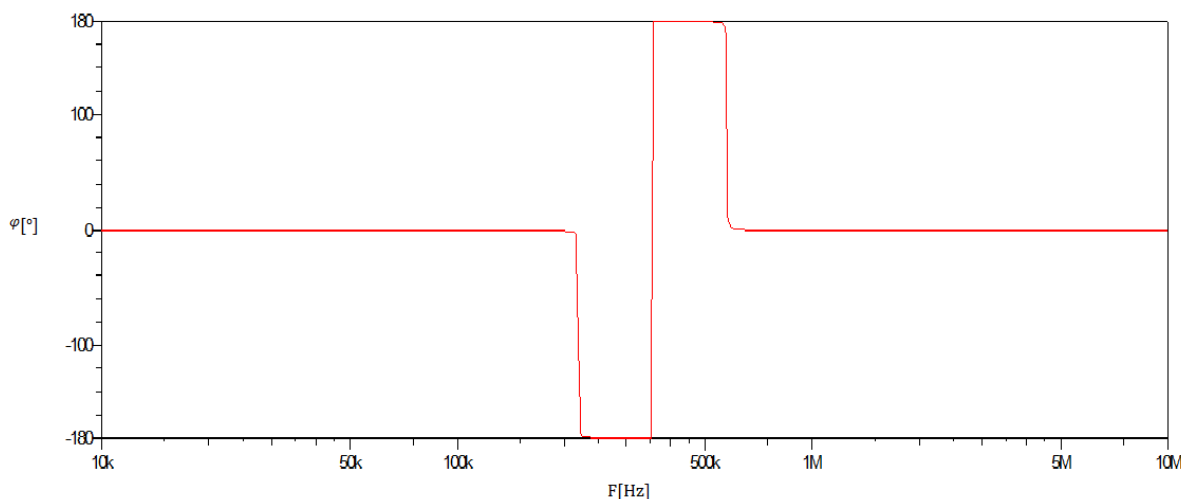
```

Obrázek 2.8: Vzorec napětového přenosu FČ 2. řádu z programu SNAP





Obrázek 2.9: Závislost napěťového přenosu fázovacího článku 2. řádu na frekvenci

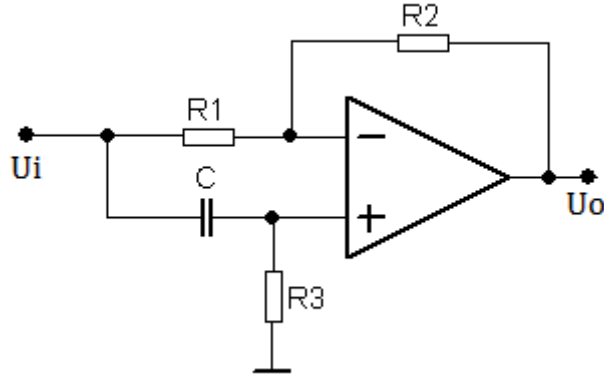


Obrázek 2.10: Závislost fáze napěťového přenosu fázovacího článku 2. řádu na frekvenci

### 2.3 Teoretický rozbor fázovacího článku s operačním zesilovačem

Fázovací články s operačním zesilovačem patří bezesporu k nepoužívanějším fázovacím článkům. Výhodou oproti pasivním filtrům je nesymetrický výstup a menší počet součástek. Nevýhodou je potřeba stejnosměrného napájení.

## 2.3.1 Fázovací článek FJ1



Obrázek 2.11: Základní fázovací jednotka FJ1

Ze schématu fázovacího článku FJ1 odvodím základní vztahy, pro odvození napěťového přenosu.

$$u_3 = u_i * \frac{R_3}{R_3 + \frac{1}{j\omega C}} = u^+$$

$$u^- = u_o + u_2$$

$$u_2 = (u_i - u_o) * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$u^- = u_o + (u_i - u_o) * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Uvažuji ideální stav, tedy  $u^+ = u^-$ , dosadím do rovnice a provedu matematické úpravy.

$$u_i * \frac{R_3}{R_3 + \frac{1}{j\omega C}} = u_o + u_i * \frac{R_2}{R_1 + R_2} - u_o * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$u_i * \left( \frac{R_3}{R_3 + \frac{1}{j\omega C}} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = u_o * \left( 1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$P_{(j\omega)} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{\frac{R_3 * (R_1 + R_2) - R_2 * \left( R_3 + \frac{1}{j\omega C} \right)}{\left( R_3 + \frac{1}{j\omega C} \right) * (R_1 + R_2)}}{\frac{R_1 + R_2 - R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{(R_1 + R_2) * [R_3 * (R_1 + R_2) - R_2 * \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C}\right)]}{R_1 * \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C}\right) * (R_1 + R_2)}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_3 * (R_1 + R_2) - R_2 * \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C}\right)}{R_1 * \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C}\right)}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_3 * (R_1 + R_2)}{R_1 * \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C}\right)} - \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_3 * (R_1 + R_2)}{R_1 * \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C}\right)} * \frac{\left(R_3 - \frac{1}{j\omega C}\right)}{\left(R_3 - \frac{1}{j\omega C}\right)} - \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_3 * (R_1 + R_2) * \left(R_3 - \frac{1}{j\omega C}\right)}{R_1 * \left(R_3^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right)} - \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_3 * (R_1 + R_2) * R_3}{R_1 * \left(R_3^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right)} - \frac{R_2}{R_1} + j \frac{R_3 * (R_1 + R_2) * \frac{1}{\omega C}}{R_1 * \left(R_3^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right)}$$

Absolutní hodnota řřenosu

$$|A| = \sqrt{Re^2 + Im^2} \quad (2.15)$$

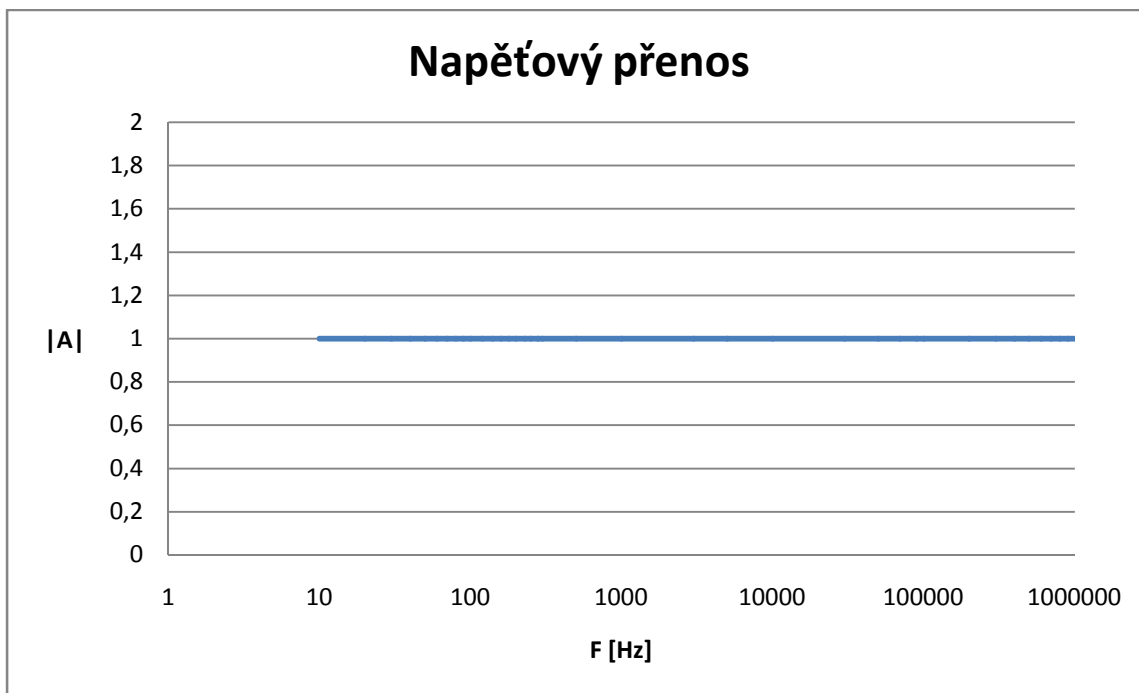
Fáze napěťového řřenosu

$$\cos(x) = \frac{Re}{|A|} \quad (2.16)$$

Mezní kmitočet

$$f_m = \frac{1}{2\pi C R_3} \quad (2.17)$$

Odvozené vztahy jsem matematicky ověřil s hodnotami souřástek  $R_1 = R_2 = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 500\Omega$ ,  $C = 100\text{nF}$ . Na kmitořtu 10Hz – 1Mhz.



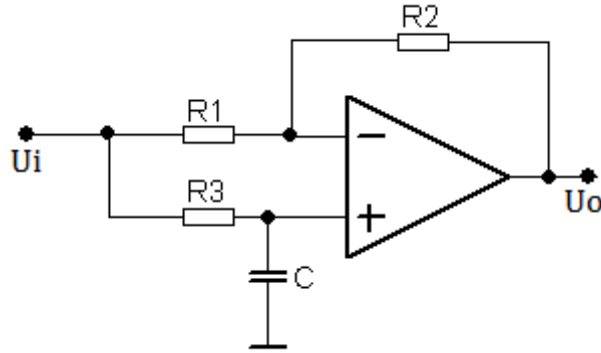
Obrázek 2.12: Graf závislosti napěťového přenosu fázovací jednotky FJ1 na kmitočtu.



Obrázek 2.13: Graf závislosti fáze napěťového přenosu fázovací jednotky FJ1 na kmitočtu.

Výpočtem jsem zjistil, že mezní kmitočet je asi 318Hz pro úhel přenosu  $\varphi = 90^\circ$ .

## 2.3.2 Fázovací článek FJ2



Obrázek 2.14: Základní fázovací jednotka FJ2

Ze schématu fázovacího článku FJ2 odvodím základní vztahy, pro odvození přenosu.

$$u_3 = u_i * \frac{\frac{1}{j\omega c}}{\frac{1}{j\omega c} + R_3} = u^+$$

$$u^- = u_o + u_2$$

$$u_2 = (u_i - u_o) * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$u^- = u_o + (u_i - u_o) * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Uvažuji ideální stav, tedy  $u^+ = u^-$ , dosadím do rovnice a provedu matematické úpravy.

$$u_i * \frac{\frac{1}{j\omega c}}{\frac{1}{j\omega c} + R_3} = u_o + u_i * \frac{R_2}{R_1 + R_2} - u_o * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$u_i * \left( \frac{\frac{1}{j\omega c}}{\frac{1 + R_3 * j\omega c}{j\omega c}} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = u_o * \left( 1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$u_i * \left( \frac{1}{j\omega c} * \frac{j\omega c}{1 + R_3 * j\omega c} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = u_o * \left( \frac{R_1 + R_2 - R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$u_i * \left( \frac{1}{1 + R_3 * j\omega c} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = u_o * \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

$$P_{(j\omega)} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{\frac{R_1 + R_2 - R_2 - R_2 * R_3 * j\omega c}{(1 + R_3 * j\omega c) * (R_1 + R_2)}}{\frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_1 - R_2 * R_3 * j\omega c}{(1 + R_3 * j\omega c) * (R_1 + R_2)} * \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_1 - R_2 * R_3 * j\omega c}{R_1 * (1 + R_3 * j\omega c)}$$

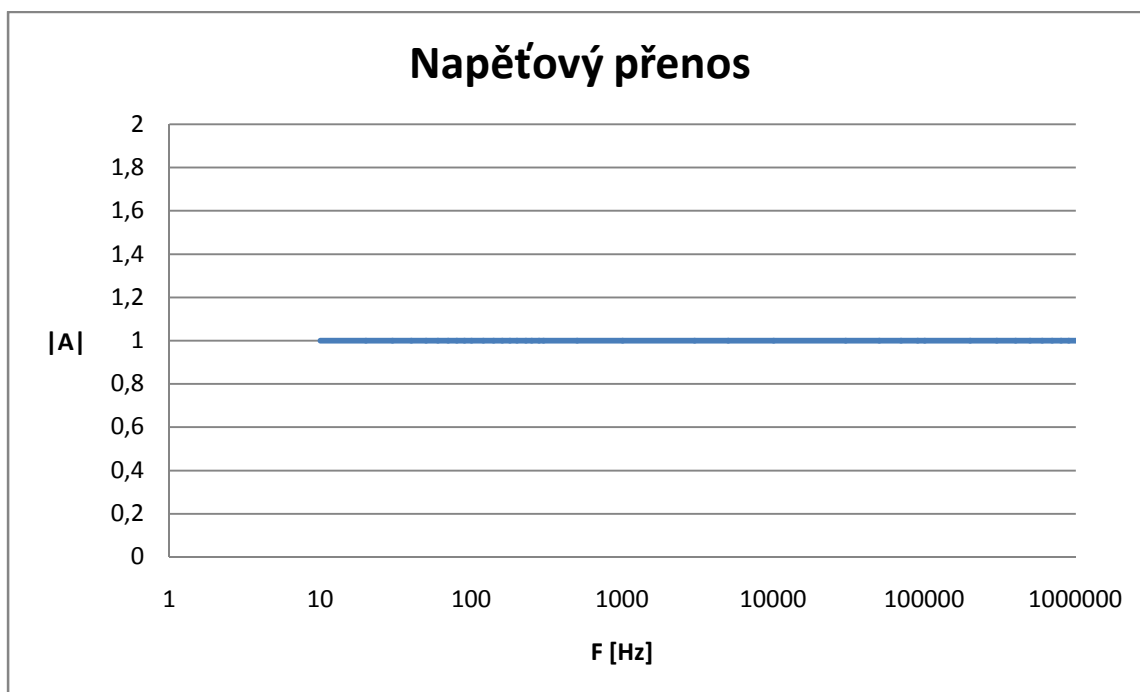
$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_1 - R_2 * R_3 * j\omega c}{R_1 * (1 + R_3 * j\omega c)} * \frac{(1 - R_3 * j\omega c)}{(1 - R_3 * j\omega c)}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_1 - R_1 * R_3 * j\omega c - R_2 * R_3 * j\omega c - R_2 * R_3^2 * \omega^2 c^2}{R_1 * (1 + R_3^2 * \omega^2 c^2)}$$

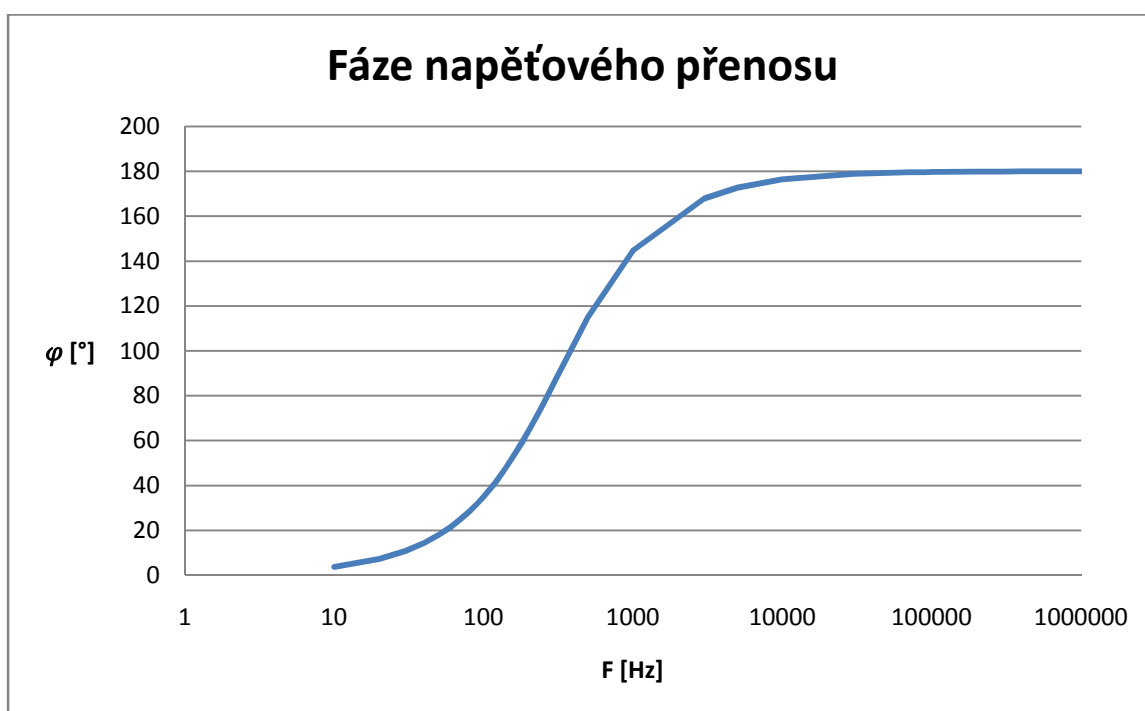
$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_1 - R_2 * R_3^2 * \omega^2 c^2}{R_1 * (1 + R_3^2 * \omega^2 c^2)} - j \frac{R_1 * R_3 * \omega c + R_2 * R_3 * \omega c}{R_1 * (1 + R_3^2 * \omega^2 c^2)}$$

Vztahy pro výpočet absolutní hodnoty přenosu, fáze napět'ového přenosu a mezního kmitočtu jsou totožné jako pro fázovací jednotku FJ1.

Odvozené vztahy jsem matematicky ověřil s hodnotami součástek  $R_1 = R_2 = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 500\Omega$ ,  $C = 100\text{nF}$ . Na kmitočtu 10Hz – 1Mhz.



Obrázek 2.15: Graf závislosti napěťového přenosu fázovací jednotky FJ2 na kmitočtu.

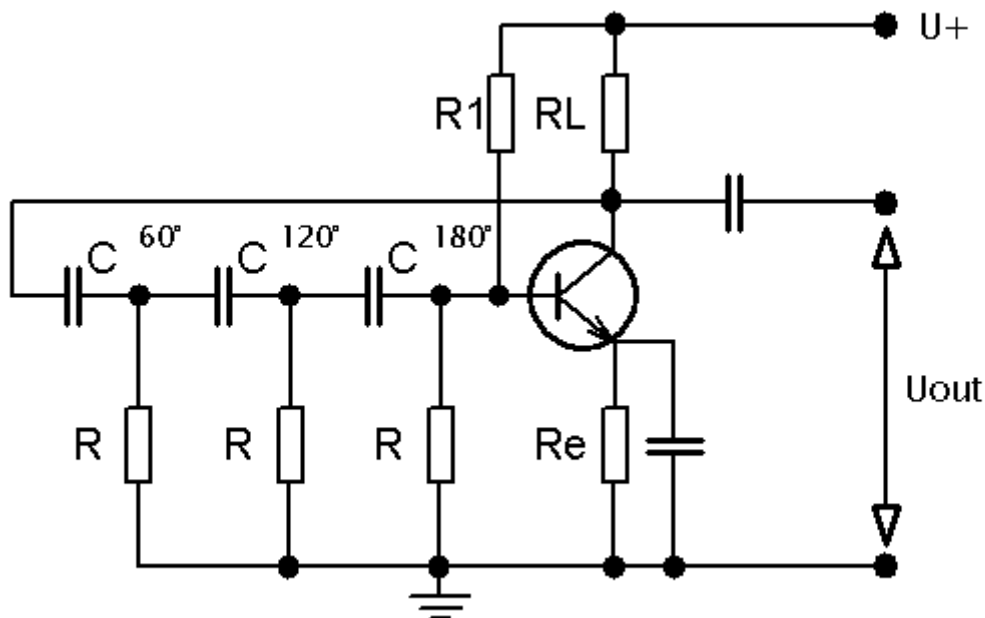


Obrázek 2.16: Graf závislosti fáze napěťového přenosu fázovací jednotky FJ2 na kmitočtu.

Výpočtem jsem zjistil, že mezní kmitočet je asi 318Hz pro úhel přenosu  $\varphi = 90^\circ$ .

### 3 Příklady využití fázovacích článků

#### 3.1 Oscilátor s fázovacími články z diskretních součástek



Obrázek 3.1: Oscilátor s FČ z diskretních součástek

Základní RC oscilátor, který je také známý jako oscilátor s fázovým posuvem, produkuje sinusový výstup signálu pomocí rekuperační zpětné vazby získané z kombinace rezistor-kondenzátor. Tato regenerační zpětná RC vazba funguje díky schopnosti kondenzátoru, udržet elektrický náboj. Změnou jednoho nebo více z odporů, nebo kondenzátorů v RC článcích, se může měnit frekvence, a to se obecně provádí tím, že se drží stejné hodnoty odporů a použijí se proměnné kondenzátory. Pokud mají všechny odpory  $R$  a kondenzátory  $C$  stejnou hodnotu, pak frekvence kmitů produkovaných RC oscilátorem je dána jako:

$$fr = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{2N}} \quad (3.1)$$

kde:

$fr$  ... je výstupní frekvence v hertzech

$R$  ... odpor v Ohmech

$C$  ... kapacita ve Faradech

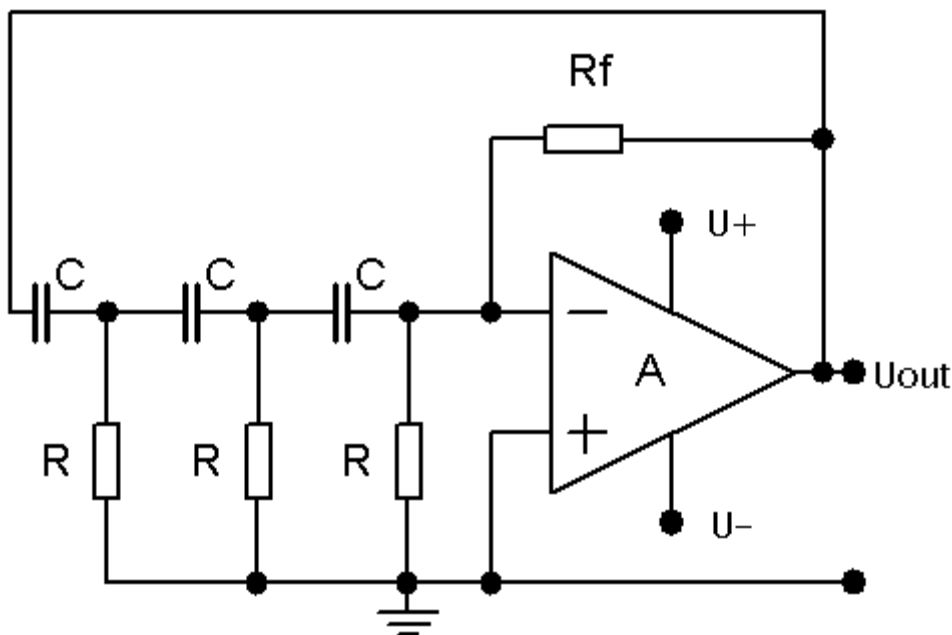
$N$  ... počet RC článků



Vzhledem k tomu, že odpor-kondenzátorová kombinace v obvodu RC oscilátoru působí také jako atenuátor, tedy že produkuje útlum, musí být dostatečné zesílení zesilovače pro překonání ztrát obvodu. Z tohoto důvodu, v oscilátoru s třemi RC články musí být zisk zesilovače větší než 29. Účinek zatížení zesilovače na zpětnovazební síť má vliv na frekvenci oscilací a může způsobit, že se frekvence oscilátoru zvýší až o 25% než je frekvence vypočtená. Pak by zpětná vazba měla být řízena vysokou impedancí výstupu zdroje do nízké impedance zátěže, jako je společný emitor tranzistoru zesilovače. Jako u oscilátoru s OZ, ten tyto podmínky splňuje dokonale.

### 3.2 Oscilátor s fázovacími články s aktivním prvkem

Použití RC oscilátoru s operačním zesilovačem jsou častější než jejich protějšky z bipolárních tranzistorů. Oscilátor se skládá ze záporného zesílení operačního zesilovače a trojice RC článků produkujících  $180^\circ$  fázový posun. Síť fázového posunu je připojena z výstupu operačního zesilovače zpět do neinvertujícího vstupu, jak je uvedeno níže.



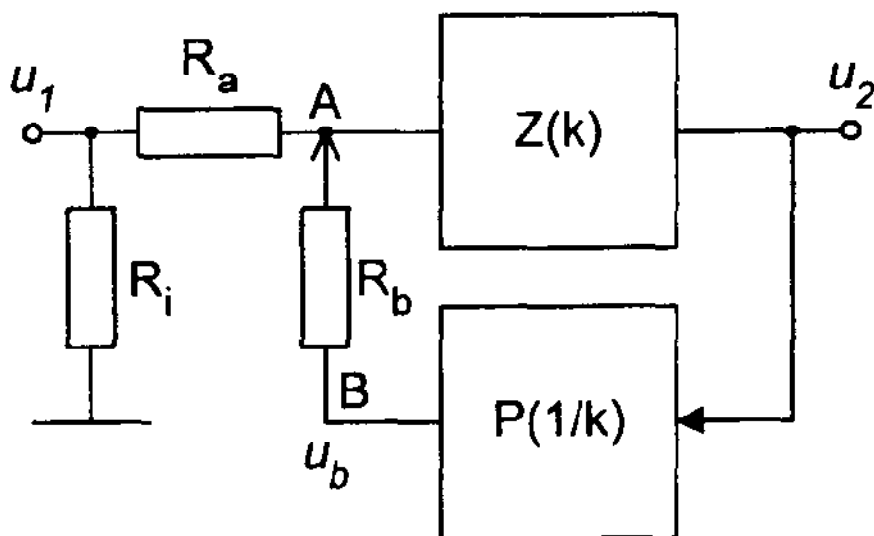
Obrázek 3.2: Oscilátor s FČ s Operačním zesilovačem

Vzhledem k tomu, že je zpětná vazba připojena na neinvertující vstup operačního zesilovače je tedy spojena ve své konfiguraci "invertující zesilovač", který produkuje fázový posun  $180^\circ$ , zatímco RC síť vytváří druhý fázový posun  $180^\circ$ . Výsledný fázový posun je tedy  $360^\circ$ . Je možné použít pouze dvou článků RC s požadovaným fázovým posunem  $180^\circ$ , v tomto případě je ale stabilita oscilátoru při nízkých frekvencích obecně špatná. Jedním z nejdůležitějších rysů RC oscilátoru je jeho stabilita kmitočtu, která je jeho schopností poskytovat konstantní frekvence sinusového výstupu za různých podmínek zatížení. Použitím tří, nebo dokonce čtyř článků RC může být stabilita oscilátoru výrazně zlepšena. RC oscilátory

jsou stabilní a poskytují dobře vytvarovaný sinusový výstup s frekvencí úměrnou  $1/RC$ , a proto širší frekvenční rozsah je možný, při použití proměnného kondenzátoru. Nicméně, RC oscilátory mají omezenou frekvenční šířku pásma, aby bylo dosaženo požadovaného fázového posunu při vysokých frekvencích.

### 3.3 Pásmová propust s vazbou typu „bootstrap“

Pásmová propust na obr. 3.3 dosahuje vysokého činitele jakosti  $Q$  i při použití operačních zesilovačů s absolutní hodnotou přenosu rovnou jedné. Umožňuje změnu  $Q$  beze změny přenosu na kmitočtu  $\omega_0$ .



Obrázek 3.3: Základní skupinové schéma pásmové propusti typu „bootstrap“;  $Z(k)$  – zesilovač s přenosem 1,  $P(1/k)$  – pásmová propust s přenosem  $1/k$  na frekvenci  $\omega_p$ .

Je-li na kmitočtu  $\omega_p$  přenos pásmové propusti  $P$  roven právě převrácené hodnotě přenosu zesilovače

$$P_z = k, \quad (3.2)$$

tedy

$$\overline{P_p} = \frac{1}{k}, \quad (3.3)$$

jsou oba vývody odporu  $R_b$  na stejných potenciálech a odporem  $R_b$  neprotéká proud. Jde tedy o frekvenčně závislý „bootstrap“. Odpor  $R_b$  se uplatňuje tím více, čím větší je poměr  $\frac{R_a}{R_b}$ .

Přenos  $\overline{P}_p$  je popsán vztahem

$$\overline{P}_p = m * \frac{\frac{p\omega_0}{Q}}{\frac{p^2 + p\omega_0}{Q + \omega_0^2}} \quad (3.4)$$

kde:

m ... je přenos propusti P na kmitočtu  $\omega_p$ ,

Q ... je činitel jakosti propusti P,

p = j $\omega$  (pro ustálený stav).

Přenos  $\overline{P}_{pp}$  celé struktury je popsán vztahem

$$\overline{P}_{pp} = k * \frac{R_b}{R_a + R_b} * \frac{\frac{p^2 + p\omega_p}{Q + \omega_p^2}}{\frac{p^2 + p\omega_p * [\frac{1 - kmR_a}{(R_a + R_b)}]}{Q + \omega_p^2}} \quad (3.5)$$

Je-li splněna podmínka

$$m = \frac{1}{k}, \quad (3.6)$$

dostaneme vztah 3.5 ve tvaru

$$\overline{P}_{pp} = k * \frac{R_b}{R_a + R_b} * \frac{\frac{p^2 + p\omega_p}{Q + \omega_p^2}}{\frac{p^2 + p\omega_p * [\frac{R_b}{(R_a + R_b)}]}{Q + \omega_p^2}}, \quad (3.7)$$

ze kterého je zřejmé, že činitel jakosti struktury  $Q_e$  je dán vztahem

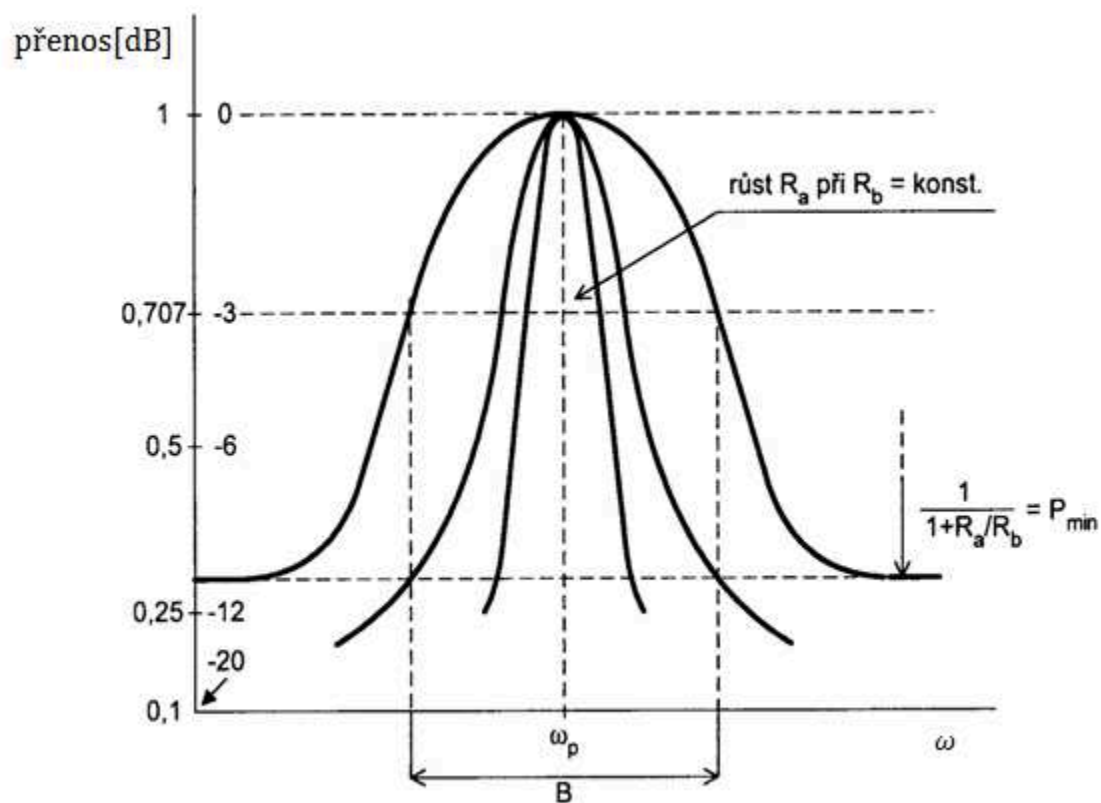
$$Q_e = Q * \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right), \quad (3.8)$$

přenos na kmitočtu  $\omega_p$  je

$$\overline{P}_{pp}(\omega_p) = k, \quad (3.9)$$

přenos  $\overline{P}_{min}$  na kmitočtech  $\omega \gg \omega_p$  a  $\omega \ll \omega_p$  je

$$\overline{P}_{min} = \frac{k}{\left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right)}. \quad (3.10)$$



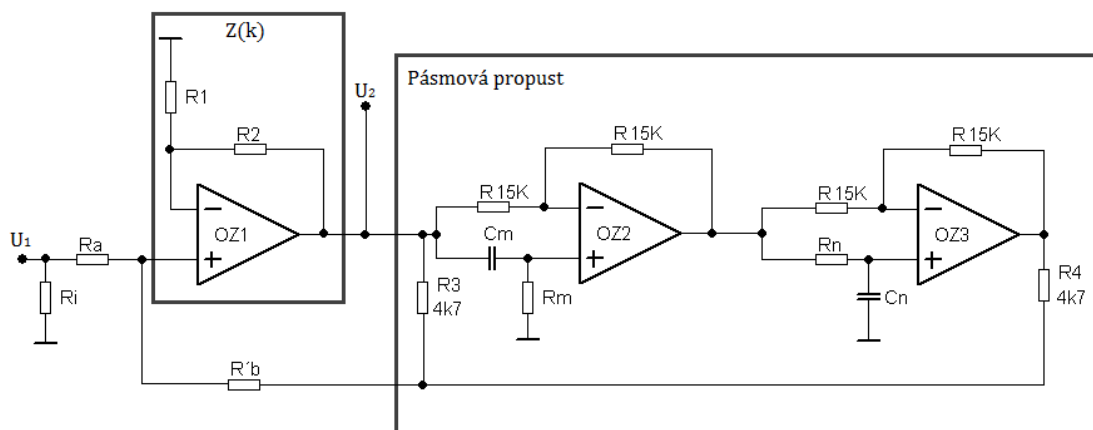
Obrázek 3.4: Přenosová charakteristika obvodu na obr. 3.3,  $B$  – šířka pásma

Na obr. 3.4 je příklad přenosových charakteristik. Změny odporů  $R_a$ ,  $R_b$  neovlivní přenos struktury na kmitočtu  $\omega_p$ , mění se pouze  $Q_a$  a  $P_{\min}$ .

## 4 Experimentální ověření pásmové propusti

Pásmová propust je realizována pomocí nepájivého pole. Při realizaci byl kladen důraz na dobré umístění obvodových součástek a co nejbližší propojení využitím propojovacích drátů.

### 4.1 Teorie pásmové propusti s vazbou typu „bootstrap“



Obrázek 4.1: Pásmová propust s třemi operačními zesilovači

Pro realizaci pásmové propusti je použita struktura s třemi operačními zesilovači viz obr. 4.1. Operační zesilovač OZ1 realizuje zesilovač  $Z(k)$ , pro který platí v lineární oblasti

$$k = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.1)$$

Operační zesilovače OZ2 a OZ3 realizují pásmovou propust na frekvenci

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{R_m * R_n * C_m * C_n}}, \quad (4.2)$$

s činitelem jakosti

$$Q = \frac{1}{\left( \sqrt{\frac{R_m * C_m}{R_n * C_n}} + \sqrt{\frac{R_n * C_n}{R_m * C_m}} \right)} = \left| \frac{R_m}{C_m} = \frac{R_n}{C_n} \right| = 0,5 \quad (4.3)$$

a jednotkovým přenosem (v lineární oblasti).

Odpor  $R_b$  je roven součtu výstupního odporu pásmové propusti a odporu  $R'_b$

$$R_b = R'_b + \frac{R_3 * R_4}{R_3 + R_4} = 2,35k\Omega \text{ (pro } R'_b = 0). \quad (4.4)$$

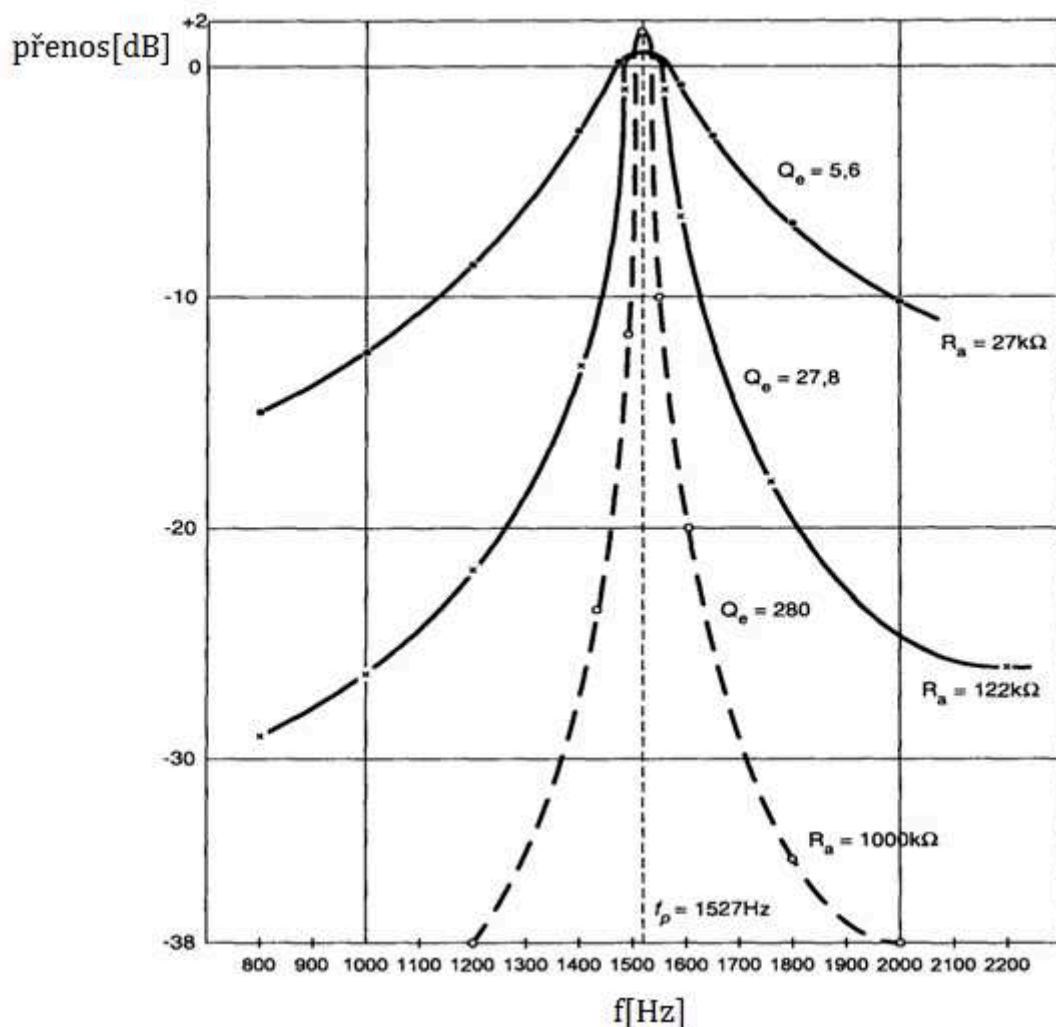
Použití základní propusti s fázovacími články je výhodné, protože frekvenci  $\omega_p$  lze měnit současnou změnou  $R_m$ ,  $R_n$ . Mění se pouze činitel jakosti  $Q$ .

Za zmínku stojí, že v žádném uzlu obvodu není signál větší než signál vstupní. Proto lze konstruovat filtry se značným činitelem jakosti a zisk struktury neroste. Je tedy možné konstruovat filtry s vstupním signálem až řadu voltů a velkým činitelem jakosti.

Při odpojení odporu  $R_i$  obvod na obr. 4.1 kmitá. Při připojení odporu  $R_i = 100k\Omega$  je zajištěna stabilita obvodu i při odpojení zdroje signálu.

U tohoto typu pásmové propusti je velkou výhodou velký povolený rozsah vstupních napětí i při velkých hodnotách činitele jakosti systému  $Q_e$ .

Při použití fázovacích článků ve zpětné vazbě pásmové propusti lze velmi snadno měnit i frekvenci maximálního přenosu a hodnoty součástek RC ovlivňují  $Q_e$  jen minimálně.



Obrázek 4.2: Kmitočtová závislost přenosu obvodu na obr. 4.1 pro  $U_1 = 100mV$ ,  $R_m = R_n = 10k\Omega$ ,  $C_m = C_n = 10nF$ ,  $R_b = 2,35k\Omega$

Z obr. 4.2 je jasně viditelná změna jakosti při změně poměru odporů  $R_a, R_b$  podle vztahu 3.8.

## 4.2 Realizace pásmové propusti s vazbou typu „bootstrap“

Podle zadání mám navrhnout pásmovou propust s jakostí  $Q = 30$  a střední frekvencí  $f = 1\text{kHz}$ . Nejprve jsem upravil vztah 4.2 pro výpočet odporu pásmové propusti (počítám že  $R_m = R_n$ ,  $C_m = C_n$ ). Volím hodnotu kondenzátoru  $C = 10\text{nF}$ .

$$R = \frac{1}{\omega_p C}$$

$$R = \frac{1}{\frac{2 * \pi * 1000}{1 * 10^{-9}}} = 15915\Omega$$

Volím jmenovitou hodnotu odporů  $R_m = R_n = 16\text{k}\Omega$ .

Při  $R_m = R_n$ ,  $C_m = C_n$  je podle vztahu 4.3 jakost fázovacího článku  $Q = 0,5$ . Volím hodnotu odporu  $R'_b = 0$ , tedy po dosažení do vztahu 4.4 je odpor  $R_b = 2,35\text{k}\Omega$ .

Upravím vztah 3.8 pro výpočet odporu  $R_a$ , pro dosažení požadované jakosti celé struktury pásmové propusti.

$$R_a = \frac{Q_e}{Q} - 1 * R_b$$

$$R_a = \frac{30}{0,5} - 1 * 2,35 = 138,65\text{k}\Omega$$

Volím jmenovitou hodnotu odporu  $R_a = 140\text{k}\Omega$ .

Výpočet šířky pásma ze vztahu

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (4.5)$$

kde

$Q$  ... je jakost

$f_0$  ... je střední frekvence

$$B = \frac{f_0}{Q} = \frac{1000}{30} = 33,3\text{Hz}$$

Zbývající hodnoty součástek jsem zvolil podle kapitoly o konstrukci pásmové propusti z knihy Operační zesilovače. Hodnoty součástek jsou zapsány v tabulce použitých součástek.

Tabulka 4.1: Tabulka použitých součástek

Popis	Značka ve schématu	Počet [ks]	Hodnota/Typ
Operační zesilovač	OZ1, OZ2, OZ3	3	TL081
Rezistor fáz. článku	R	4	15k $\Omega$
Rezistor fáz. článku	R <sub>m</sub> , R <sub>n</sub>	2	16 k $\Omega$
Rezistor fáz. článku	R <sub>3</sub> , R <sub>4</sub>	2	4k7
Kondenzátor fáz. článku	C <sub>m</sub> , C <sub>n</sub>	2	10nF
Rezistor zesilovače	R <sub>1</sub>	1	18k $\Omega$
Rezistor zesilovače	R <sub>2</sub>	1	15 $\Omega$
Rezistor	R <sub>a</sub>	1	150k $\Omega$
Rezistor	R <sub>i</sub>	1	100k $\Omega$
Blokovací kondenzátor	-	6	100nF

Při měření pásmové propusti s vypočítanými hodnotami součástek jsem nebyl schopen pásmovou propust odměřit. Důvodem byly nežádoucí přenosy a parazitní vazby. Na vině byla částečně i konstrukce pásmové propusti na nepájivém poli. Pro experimentální ověření jsem byl nucen upravit hodnoty součástek tak, aby bylo možné pásmovou propust odměřit. Provedl jsem změnu hodnoty rezistoru  $R_a$  ze 150k $\Omega$  na hodnotu 10k $\Omega$ . Dále jsem přidal odpor  $R'_b$  s hodnotou 1,2k $\Omega$ . Tímto byla upravena i jakost obvodu viz výpočet níže, na hodnotu 1,90.

$$Q_e = 0,5 * \left(1 + \frac{10}{3,55}\right) = 1,90$$

Obvod byl navržen pro střední frekvenci  $F = 1\text{kHz}$ . Naměřená střední frekvence se od vypočítané lišila. Naměřená střední frekvence  $F = 1200\text{Hz}$ .

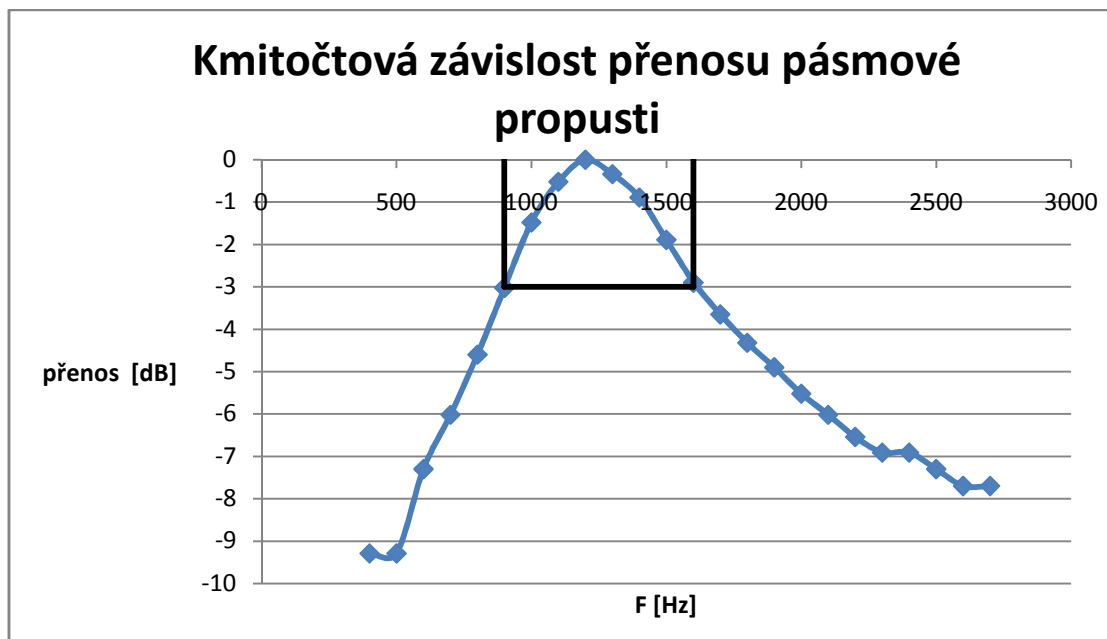
Obvod jsem tedy pro experimentální ověření odměřil pro tuto jakost. Se změnou jakosti obvodu se změnila i šířka pásma.

$$B = \frac{1200}{1,90} = 631\text{Hz}$$



Tabulka 4.2: Tabulka naměřených hodnot

Frekvence [Hz]	Napětí U1 [mV]	Napětí U2 [mV]	Útlum [dB]
400	204	70	-9,29
500	204	80	-9,29
600	204	88	-7,30
700	204	102	-6,02
800	204	120	-4,60
900	204	144	-3,02
1000	204	172	-1,48
1100	204	192	-0,52
1200	204	204	0
1300	204	169	-0,34
1400	204	184	-0,89
1500	204	164	-1,89
1600	204	146	-2,90
1700	204	134	-3,65
1800	204	124	-4,32
1900	204	116	-4,90
2000	204	108	-5,52
2100	204	102	-6,02
2200	204	96	-6,54
2300	204	92	-6,91
2400	204	92	-6,91
2500	204	88	-7,30
2600	204	84	-7,70
2700	204	84	-7,70



Obrázek 4.3: Graf kmitočtové závislosti přenosu pásmové propusti, s vyznačením šířky pásma.

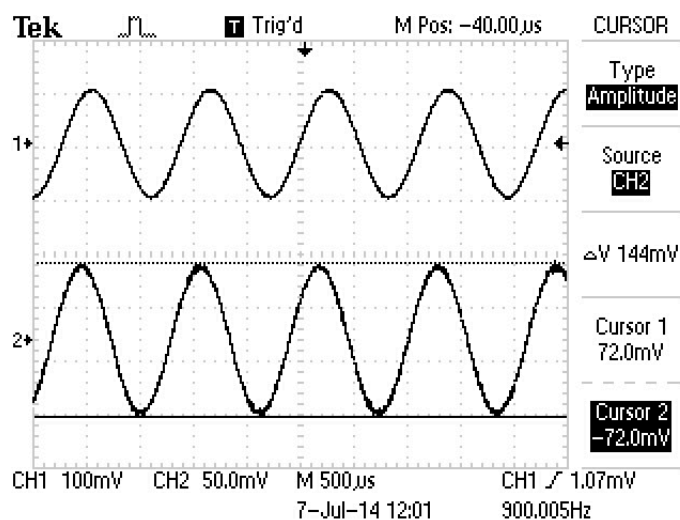
Při poklesu o 3dB jsem z grafu vyčetl horní mezní kmitočet  $f_h = 1600\text{Hz}$  a dolní mezní kmitočet  $f_d = 900\text{Hz}$ .

$$B = f_h - f_d \quad (4.6)$$

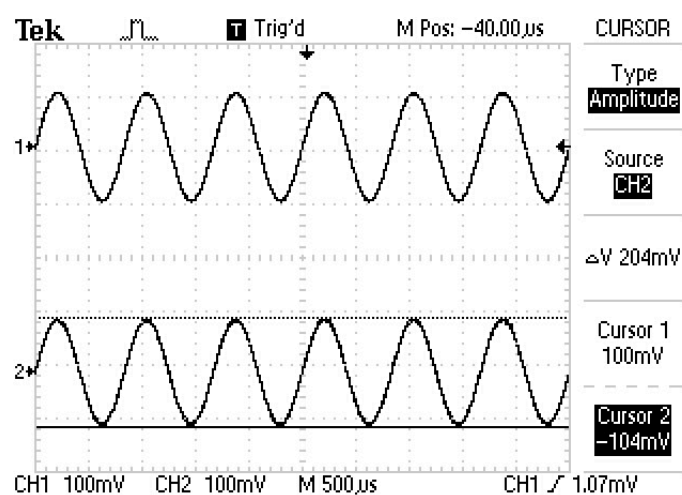
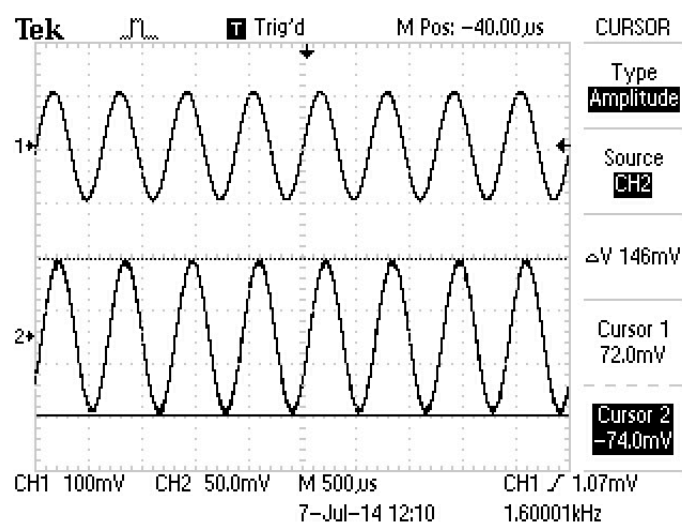
Po dosazení do vztahu 4.6 pro výpočet šířky pásma, vyšla šířka pásma na 700Hz.

$$B = 1600 - 900 = 700\text{Hz}$$

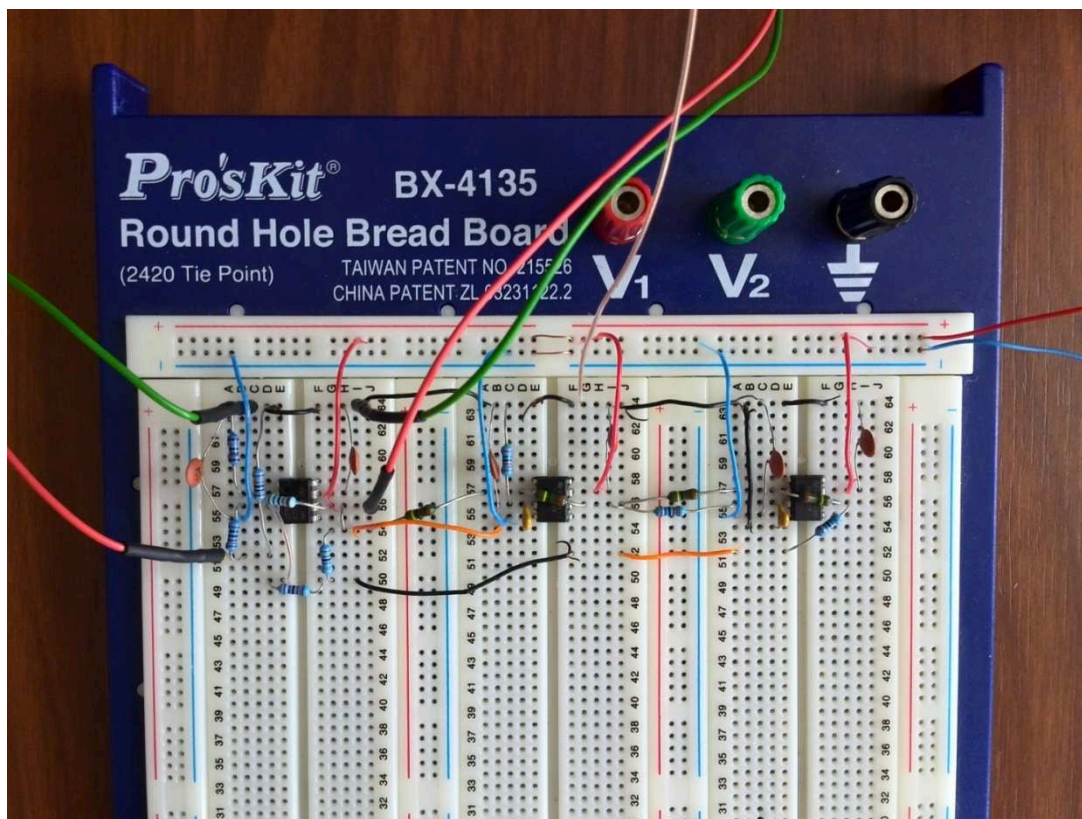
#### 4.2.1 Výstupní charakteristiky



Obrázek 4.4: Dolní mezní kmitočet  $f_d = 900\text{Hz}$  ověřované pásmové propusti

Obrázek 4.5: Střední frekvence  $f = 1200\text{Hz}$  ověřované pásmové propustiObrázek 4.6: Horní mezní frekvence  $f_h = 1600\text{Hz}$  ověřované pásmové propusti

### 4.2.2 Fotografie zkonstruované pásmové propusti



Obrázek 4.7: Zapojení ověřované pásmové propusti na nepájivém poli

## Závěr

V bakalářské práci se věnuji fázovacím článkům, jejich analýze a následné realizaci.

V teoretické části jsou rozebrány řady nejběžnějších fázovacích článků. Podrobněji je rozebrán a odvozen fázovací článek s operačními zesilovači. Dále jsou v práci uvedeny příklady využití fázovacích článků při konstrukci oscilátorů a frekvenčních filtrů.

V praktické části práce je navržena pásmová propust s operačními zesilovači, která je i prakticky odměřena. Z naměřených výsledků vyplývá, že pásmová propust s operačními zesilovači pracuje podle teoretických předpokladů, i když se v praktické realizaci nepodařilo dosáhnout zadané jakosti obvodu  $Q$ . Zadané jakosti se nedalo dosáhnout kvůli parazitním vazbám na geometricky rozměrném nepájivém poli. Pro dosažení zadané hodnoty jakosti obvodu by bylo potřeba zrealizovat pásmovou propust na DPS. Při snaze dosáhnout zadané jakosti jsem experimentoval s poměry odporů  $R_a$ ,  $R_b$  jimiž je jakost nastavována. Při překročení hodnoty  $10k\Omega$  na odporu  $R_a$  se obvod rozkmital. Nebylo tedy možné dosáhnout zadané jakosti. Reálné výsledky se od teoretických liší, protože při návrhu počítáme s ideálními prvky, které mají v reálu určitá omezení.

Přínosem bakalářské práce je otestování fázovacích článků při konstrukci frekvenčních filtrů. Praktické porovnání vypočítaných výsledků s výsledky reálnými.

## Použitá literatura

- [1] Punčochář, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN, 2005, 495 s. ISBN 80-7300-059-8.
- [2] Winder, Steve. *Analog and Digital Filter Design*. 2002, 450 s. ISBN 0-7506-7547-0.
- [3] Dostál, Jiří. *Operační zesilovače*. Praha SNTL, 1981, 450 s. ISBN 0-7506-7547-0.
- [4] <http://www.urel.feec.vutbr.cz/> [online]. [ cit. 2014-4-24]  
Dostupné z <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/belf/fazovaci%20clanky.pdf>
- [5] <http://www.electronics-tutorials.ws/> [online]. [ cit. 2014-4-25]  
Dostupné z [http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/rc\\_oscillator.html](http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/rc_oscillator.html)
- [6] <http://www.analog.com/> [online]. [ cit. 2014-4-25]  
Dostupné z <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-202.pdf>

---

## Seznam příloh

Příloha A:	<i>Katalogový list operačního zesilovače TL082.....</i>	<i>I</i>
Příloha B:	<i>Výpočty teoretického rozboru fázovacího článku FJ1.....</i>	<i>II</i>
Příloha C:	<i>Výpočty teoretického rozboru fázovacího článku FJ2.....</i>	<i>III</i>

Součástí BP je CD.